

Rapport de stage - LAPP

12 juin 2015

1 Le modèle standard

1.1 Généralités

Le modèle standard est une description des particules élémentaires et des interactions qui les régissent dans le cadre de la mécanique quantique et de la relativité restreinte.

FIGURE 1 – Particules élémentaires du modèle standard. A gauche, les fermions (spin demi entier). A droite, les bosons (spin entier).

spin	charge/e
masse · c ²	
symbole	
nom	

Particules élémentaires du modèle standard

Quarks

1/2 1,5-4 MeV u up	1/2 1,15-1,35 GeV c charm	1/2 173,3±0,8 GeV t top
1/2 4-8 MeV d down	1/2 80-130 MeV s strange	1/2 4,1-4,4 GeV b bottom

Leptons

1/2 511 keV e electron	1/2 105,66 MeV μ muon	1/2 1,777 GeV τ tau
1/2 <2,5 eV ν_e neutrino e	1/2 <170 keV ν_μ neutrino μ	1/2 <18 MeV ν_τ neutrino τ

Neutrinos

Bosons

0 0 γ photon
1 0 g gluon
0 125,36±0,41 GeV H Higgs
1 80,385±0,015 GeV W Weak
1 91,187±0,002 GeV Z

Le photon est le boson vecteur de l'interaction électromagnétique. Les bosons W et Z sont

les bosons vecteurs de l'interaction faible. Le gluon est le boson vecteur de l'interaction forte (à laquelle sont sensibles les quarks, et les hadrons, particules composées de quarks).

2 Boson de Higgs

2.1 Caractéristiques

Le boson de Higgs est une particule élémentaire du modèle standard de masse $\simeq 125$ GeV et de spin nul et découverte grâce aux expériences CMS et Atlas. Son existence a été suggérée en 1964 afin de proposer une explication cohérente avec le modèle standard d'une masse non nulle pour les bosons de jauge W^\pm et Z .

2.2 Formation

Il existe de nombreux processus entrainant la production de boson de Higgs. En voici des exemples envisageables ainsi que leur section efficace associée dans les conditions du LHC (Run1, $\sqrt{s} = 8$ TeV).

2.2.1 Fusion gluon gluon ($gg \rightarrow H$)

La fusion gluon gluon est le mode de production du Higgs le plus important.

La section efficace totale du processus est de 19,23 pb à $\sqrt{s} = 8$ TeV et 43,94 pb à $\sqrt{s} = 13$ TeV[1]

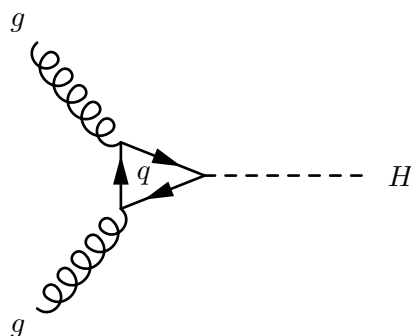


FIGURE 2 – Formation d'un Higgs par fusion de gluons (avec apparition de quarks virtuels, préférentiellement lourds).

2.2.2 Vector Boson Fusion (VBF, $ff \rightarrow ffH$)

La section efficace du processus VBF est de 1,58 pb à $\sqrt{s} = 8$ TeV et 3,75 à $\sqrt{s} = 13$ TeV. Il s'agit du second mode de production du Higgs le plus probable.

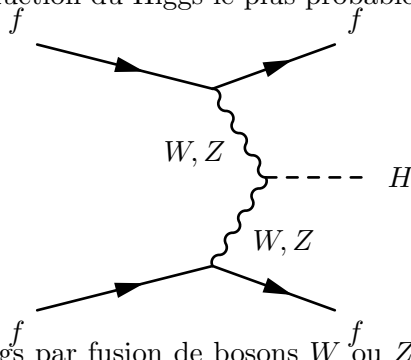


FIGURE 3 – Formation d'un Higgs par fusion de bosons W ou Z virtuels échangés entre deux fermions.

2.2.3 Higgs Strahlung ($f\bar{f} \rightarrow WH$ ou ZH)

La section efficace totale pour ce processus est $\sigma = \sigma_W + \sigma_Z = 0,7 + 0,4 = 1,1$ pb à $\sqrt{s} = 8$ TeV et $\sigma = 2,3$ à $\sqrt{s} = 13$ TeV

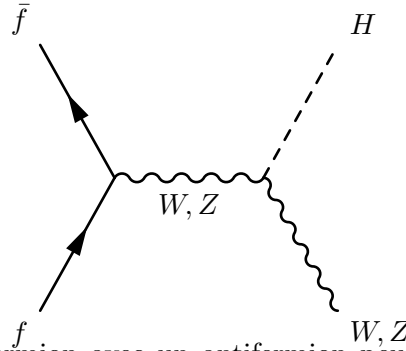
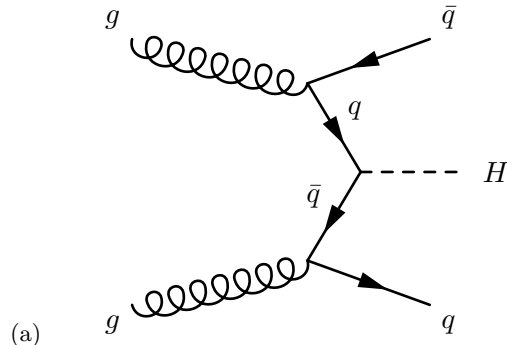
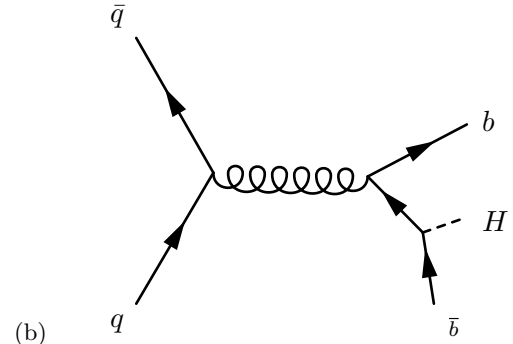


FIGURE 4 – La collision d'un fermion avec un antifermion peut produire un boson W ou Z pouvant émettre un H .

2.2.4 Top/bottom fusion (ex : $gg \rightarrow q\bar{q}H$, $q = t, b$)



(a) Ici, deux gluons produisent deux paires $t\bar{t}$ ou $b\bar{b}$. Une d'entre elles fusionne et produit un H . Il s'agit d'un processus mineur ($\sigma = \sigma_b + \sigma_t = 0,20 + 0,13 = 0,33$ pb à 8 TeV et $\sigma = \sigma_b + \sigma_t = 0,6 + 0,6 = 1,2$ pb à 14 TeV)



(b) Un autre exemple de production $q\bar{q}H$ (ici $q\bar{q} \rightarrow b\bar{b}H$)

Ces processus sont l'objet d'une attention particulière, malgré leur faible section efficace. En effet, ils introduisent un couplage direct entre H et des quarks lourds. L'intensité de ce couplage étant proportionnelle à la masse des quarks, elle est très forte dans le cas des top. Etudier ces événements permettrait donc une mesure directe du couplage H - fermion à des masses élevées. [2]

2.2.5 Section efficace totale $pp \rightarrow H$

\sqrt{s} (TeV)	$\sigma_{pp \rightarrow H}$ (pb)
7	17,5
8	22,3
13	50,9
14	58.0

FIGURE 6 – Section efficace totale pour le processus $pp \rightarrow H$ en fonction de l'énergie des faisceaux. Augmenter l'énergie augmente σ_H de façon significative.

2.3 Désintégration

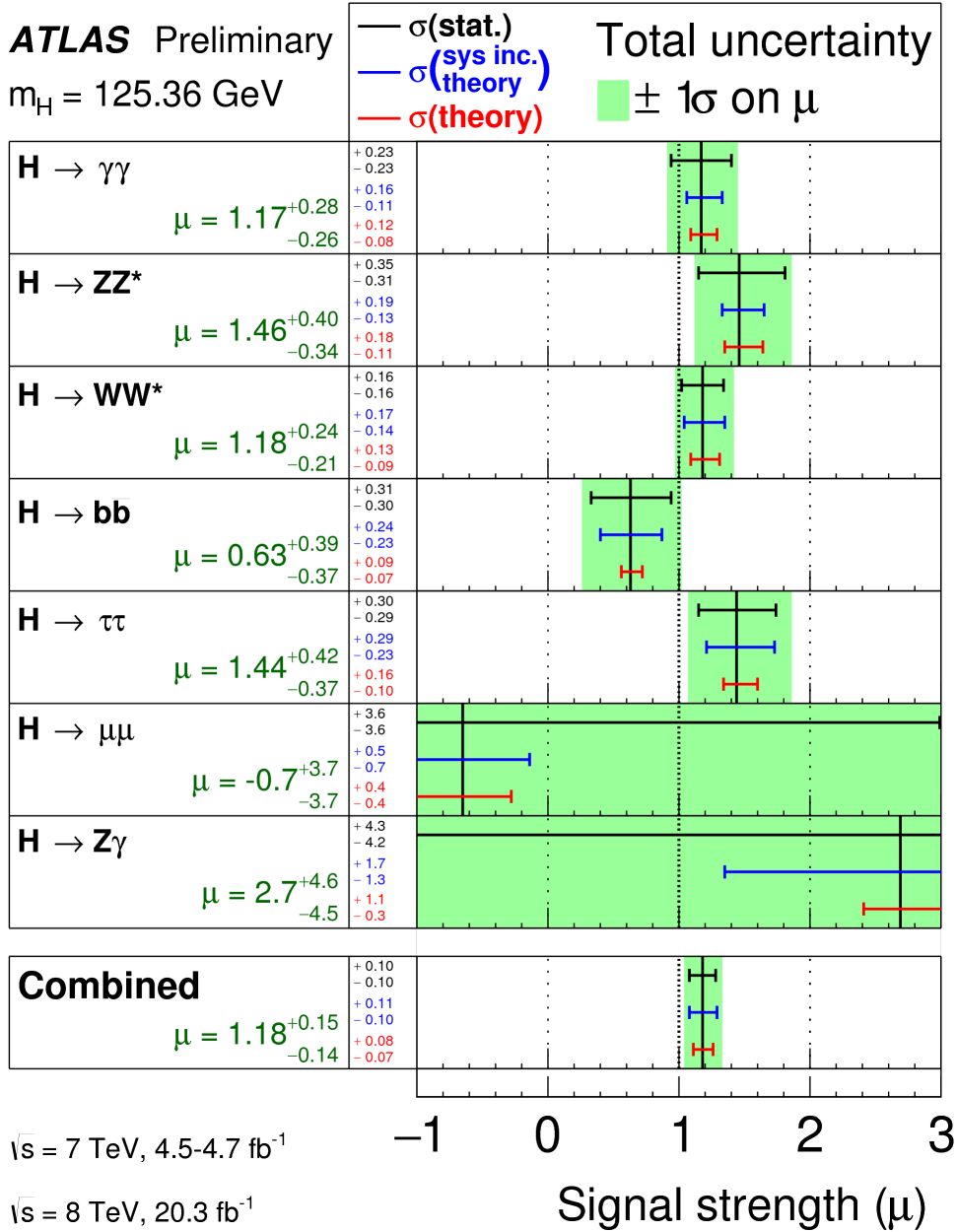
Type	Exemple	Ratio de branche
$H \rightarrow \text{fermions}$	$H \rightarrow b\bar{b}$	57,7 %
	$H \rightarrow \tau\bar{\tau}$	6,4 %
	$H \rightarrow \mu\bar{\mu}$	0,02 %
$H \rightarrow \text{bosons de jauge}$	$H \rightarrow WW$	21,5 %
	$H \rightarrow ZZ$	2,63 %
	$H \rightarrow \gamma\gamma$	0,23 %

FIGURE 7 – Différents modes de désintégration possibles pour le Higgs, ainsi que leur probabilité respective.

2.4 Produits de désintégration et choix de méthode d'observation

Pour détecter la présence d'un boson de Higgs parmi un évènement il faut étudier ses produits de désintégrations et vérifier qu'ils sont compatibles avec un H . Il faut pour cela que les particules produites soient détectables et que l'on puisse mesurer leurs paramètres cinématiques avec suffisamment de précision.

FIGURE 8 – Résultats de l'expérience Atlas sur la détection du Higgs à travers sa désintégration par différents modes. Les signaux extraits sont comparés aux valeurs attendues selon le modèle standard.



2.4.1 $H \rightarrow \gamma\gamma$

La désintégration du Higgs en deux photons est une méthode d'observation privilégiée. Bien que le ratio associé à cette branche soit très faible (2 pour 1000), ce qui implique que peu de Higgs formés seront observables de cette façon, il est plus facile de détecter de tels photons avec une grande précision sur leur énergie et direction. La connaissance précise de l'impulsion de la paire de photons permet alors de remonter à la masse d'un Higgs dont ils seraient issus simplement (il s'agit de la masse invariante du système formé par la paire). Un inconvénient de ce canal est qu'il n'aurait pas permis de détecter un Higgs lourd ($> 200 \text{ GeV}$).

\sqrt{s} (TeV)	$\sigma_{pp \rightarrow H \rightarrow \gamma\gamma}$ (fb)
7	40
8	51
13	117
14	133

FIGURE 9 – Sections efficaces associées à la désintégration d'un Higgs en $\gamma\gamma$, en fonction de l'énergie du faisceau.

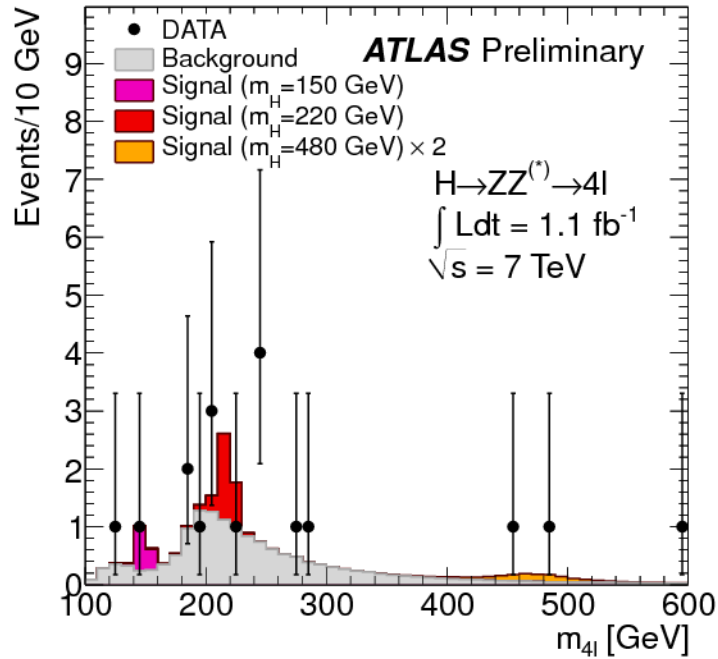
2.4.2 $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow \ell\ell\ell\ell$

Une autre voie privilégiée est la désintégration d'un H en une paire de ZZ^* puis 4 leptons ($4e$, 4μ ou $2e2\mu$). Bien que la section efficace totale d'un tel processus soit encore inférieure à celle de la voie $\gamma\gamma$ aux alentours de 125 GeV (la probabilité qu'un Z se désintégrant en paire ee ou $\mu\mu$ étant de 3,4 % seulement), cette méthode est très intéressante en raison d'un excellent rapport signal/bruit et d'une précision correcte sur la masse reconstruite. De plus, dans l'hypothèse d'un Higgs lourd, les désintégrations d'un Higgs en paire de Z deviennent très probables, et le bruit de fond très faible.

\sqrt{s} (TeV)	$\sigma_{pp \rightarrow H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4\ell}$ (fb)
7	2,2
8	2,7
13	6,2
14	7,0

FIGURE 10 – Sections efficaces associées à la désintégration d'un Higgs en ZZ^* puis 4ℓ , en fonction de l'énergie du faisceau.

FIGURE 11 – Signal et bruit de fond attendus pour différentes masses du Higgs dans le canal 4ℓ



2.4.3 $H \rightarrow W^+W^-$

2.4.4 $H \rightarrow \tau^+\tau^- \rightarrow \ell\ell, \ell\text{-jet ou jet-jet}$

La désintégration d'un H en paire $\tau^+\tau^-$ offre une autre voie d'observation du Higgs. Elle pose cependant des difficultés : les particules τ ne sont pas détectables directement. Elles sont donc reconstruites à partir de leurs produits de désintégrations. Ces produits sont des hadrons (identifiables par des 'jets') dans 65 % des cas environ et des leptons dans les 35 % des cas restants. Cela implique une reconstruction à partir d'au moins un jet dans 90 % des cas, qui sont soumis à un bruit de background important. De plus, au moins un neutrino est émis (en vertu de la conservation du nombre tauonique) lors d'une désintégration d'un τ , et un de plus lorsqu'il se désintègre en un autre lepton, ce qui pose problème pour la reconstruction des masses et impulsions puisque les neutrinos ne sont pas détectables.

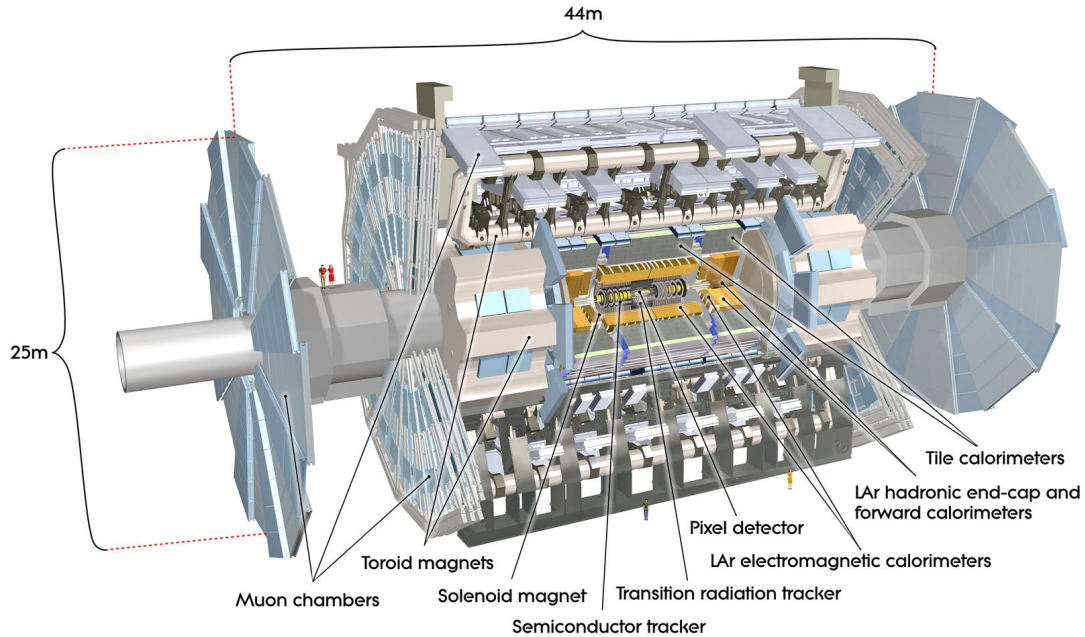
3 Atlas

3.1 Généralités

Atlas fait partie des 4 expériences principales situées sur le LHC (Large Hadron Collider) avec CMS, ALICE et LHCb. Elle étudie des collisions entre protons accélérés par le LHC à des énergies de centre de masse jusqu'à 14 TeV. Son objectif est de confirmer les dernières prédictions non testées du modèle standard (Higgs) ou encore la recherche de preuves de supersymétrie et de nouvelle physique. Avec CMS, cette expérience a effectivement permis la découverte du boson de Higgs en 2013.

3.2 Détecteurs

FIGURE 12 – Schéma du détecteur Atlas



3.2.1 Tracking, détermination de la charge et de l'impulsion

Le détecteur intérieur (inner-detector), au plus proche des collisions, est constitué de trois sous-détecteurs : le **Pixel detector**, le **Semiconductor Detector** et le **Transition radiaton**

detector. Dans les deux premiers détecteurs, le passage d'un photon ou d'une particule chargée crée des paires électrons-trous qui créent un courant mesurable sous l'influence d'un champ électrique. Le **Transition radiation detector** détecte le passage des particules par ionisation d'un gaz. Il permet de plus de détecter les photons émis par rayonnement de transition lorsqu'une particule traverse successivement des milieux d'indices différents, ce qui donne une mesure directe de son facteur de Lorentz γ .

Le champ magnétique uniforme régnant dans le détecteur intérieur grâce au **Solenoid Magnet** courbe la trajectoire des particules chargées. En fonction des points de détection obtenus grâce à ces détecteurs il est possible de reconstruire les traces des particules et leur charge à partir du sens de la courbure ainsi que leur impulsion (à partir du rayon de courbure) :

$$R_c = \frac{\gamma m v_{\perp}}{q B_0} = \frac{p_T}{q B_0} \quad (1)$$

3.2.2 Détermination de l'énergie et de la nature des particules

La mesure de l'énergie des particules se fait à l'aide de deux calorimètres : un calorimètre électromagnétique (**LAr Electromagnetic Calorimeter**), et le calorimètre hadronique. Les particules susceptibles d'interagir avec ces calorimètres génèrent des "douches". Celles-ci sont reconstruites pour remonter à l'énergie et la direction de la particule d'origine.

Les muons n'interagissent pas avec ces détecteurs : ils sont mesurés à l'aide d'un dispositif externe (Muon spectrometer), qui repose en partie sur le tracking par rayon de courbure magnétique, à l'aide d'un champ intense mais complexe imposé par les **Toroid Magnets**.

3.3 Performances

La portée des résultats physiques de l'expérience repose entre autres sur les performances du détecteur. Ces performances concernent la qualité des données (résolution élevée, erreurs faibles) et de quantité (peu d'événements "perdus"). Elles peuvent être évaluées expérimentalement ou anticipées grâce à des modèles. Ici, on utilise des données issues de simulation Monte-Carlo afin d'estimer quantitativement les performances des détecteurs qui sont importantes pour l'étude des événements $H \rightarrow \gamma\gamma$.

3.3.1 Résolution en énergie du calorimètre EM

Plusieurs facteurs limitent la résolution en énergie du calorimètre. Celle-ci peut être évaluée de la façon suivante :

$$\frac{\sigma_E}{E} \simeq \frac{a}{\sqrt{E}} \oplus \frac{b}{E} \oplus c \quad (2)$$

Le terme $\propto a$ représente l'erreur d'origine statistique, b le bruit électronique et c les erreurs constantes de non-linéarité/calibration..

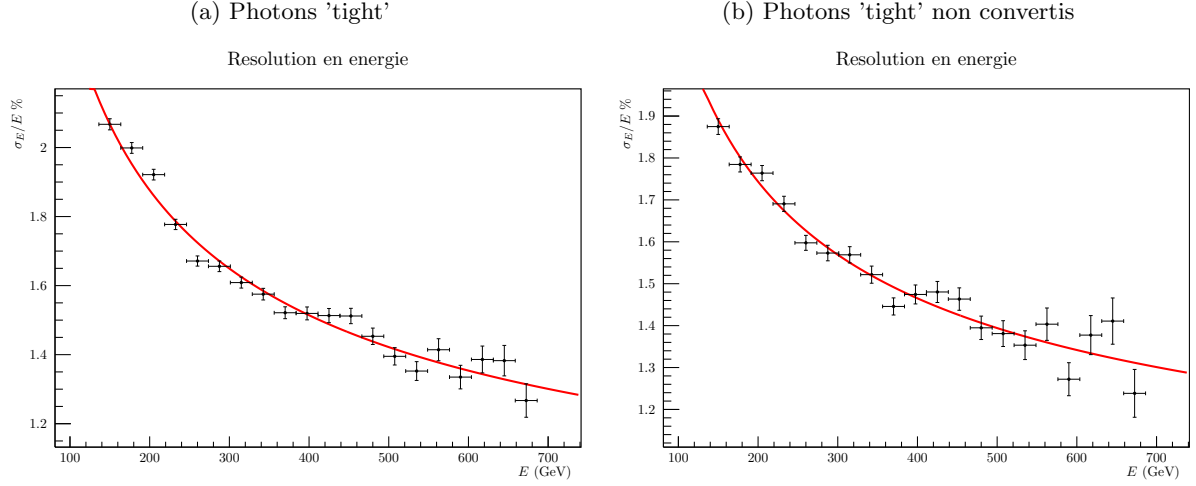
Aux énergies qui nous intéressent (> 10 GeV), le bruit électronique est négligeable ($b \sim 100$ MeV) et la résolution prend une forme :

$$\frac{\sigma_E}{E} \sim \frac{a}{\sqrt{E}} \oplus c \quad (3)$$

A l'aide des simulations Monte-Carlo, on estime la résolution en énergie en fonction de l'énergie des photons mesurés, afin de vérifier si ce comportement est bien reproduit. Pour cela, on compare les données vraies aux données telles qu'elles devraient être reconstruites par le détecteur. (figures 13, 14a et ??).

Photons convertis inclus	η	$a(\% \cdot \text{GeV}^{1/2})$	$c(\%)$
Oui	tous	18 ± 1	$0,6 \pm 0,1$
Non	tous	13 ± 1	$0,8 \pm 0,1$
Oui	$ \eta < 1$	10 ± 1	$0,9 \pm 0,1$
Oui	$ \eta > 1,5$	13 ± 2	$1,8 \pm 0,2$

FIGURE 13 – Pour plusieurs bandes d'énergie, on calcule l'écart entre les données vraies et reconstruites à partir d'une simulation. On obtient les paramètres a et c après fit de $E \mapsto \sigma_E(E)$.



3.4 Efficacité de reconstruction $\gamma\gamma$

Il est nécessaire de tester l'efficacité du détecteur (c'est-à-dire sa capacité à détecter et reconstruire des événements) pour plusieurs raisons :

- Cela permet d'estimer la possibilité d'établir des conclusions physique pour une taille d'échantillon donnée
- Cela peut renseigner sur l'influence de certains paramètres sur les performances des détecteurs et éventuellement de corriger des biais

On compare donc (sur des données simulées) le taux d'événements diphoton reconstruits et passant certains critères de qualité minimum. ('tight')

FIGURE 15 – Efficacité de sélection des paires de photons 'tight' en fonction de η . La zone de « crack » est bien apparente sur cette figure.

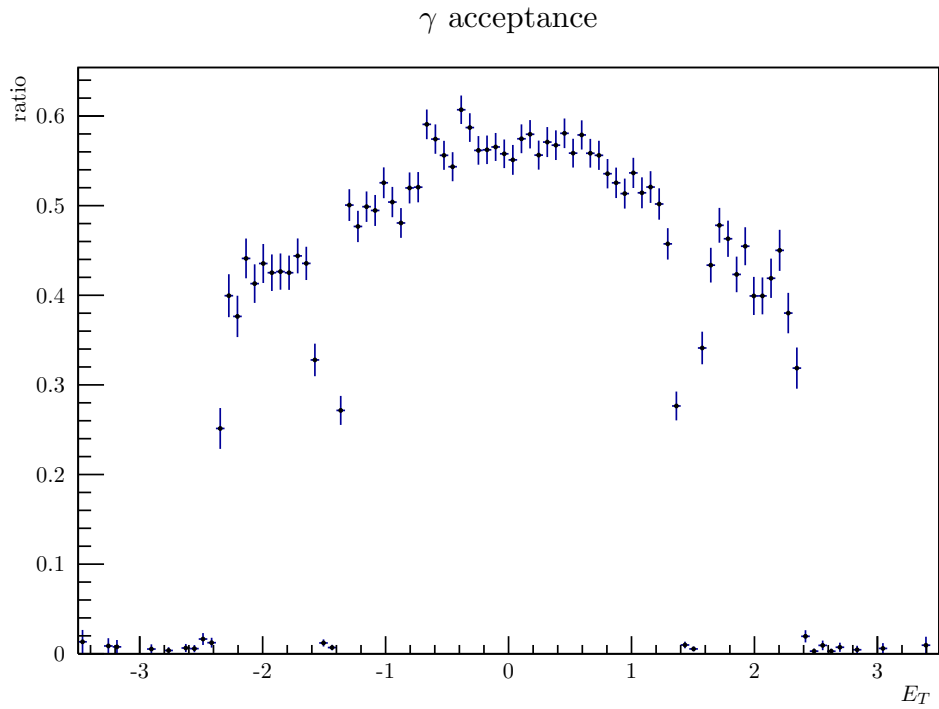


FIGURE 16 – Efficacité de sélection des photons en fonction de l'énergie transverse E_t .

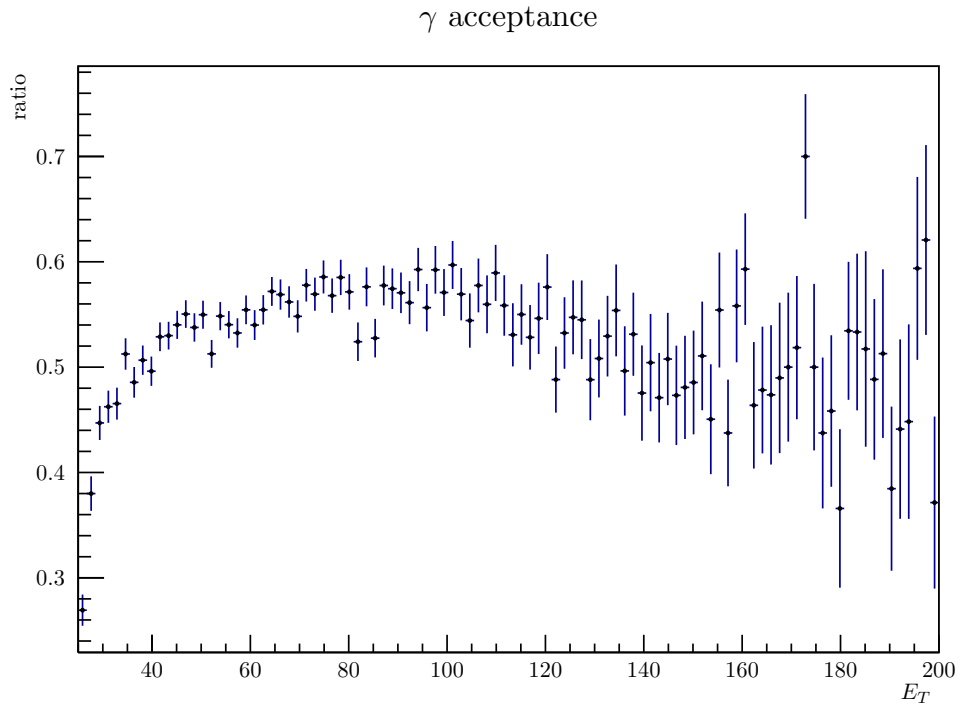


FIGURE 17

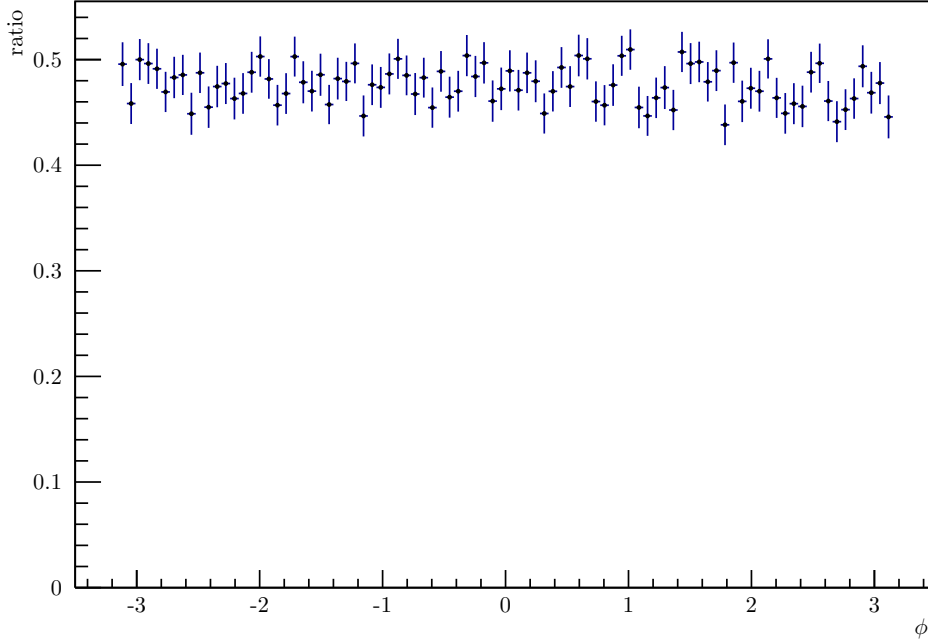
 γ acceptance

FIGURE 18 – Efficacité de sélection des photons en fonction de ϕ . On constate que celle-ci est constante sur $[-\pi, \pi]$ ce qui est attendu pour des raisons de symétrie.

4 Etude des données d'Atlas du run 1

4.1 Etude de données simulées

Afin de mieux comprendre les caractéristiques du signal attendu et les celles du détecteur, on travaille sur un échantillon de données comprenant des événements simulés (méthode de Monte Carlo) et les événements associés tels qu'ils seraient reconstruits par Atlas.

L'échantillon étudié ici se restreint à la production de ZH et à leur désintégration.

Dans ce cas, on s'intéresse d'une part aux paires de photons issues des désintégrations de Higgs, et aux paires de leptons (e^+e^- , $\mu^+\mu^-$)

4.2 Calcul de la masse invariante d'un système à deux particules.

En connaissant l'énergie des photons produits de la désintégration du Higgs selon la forme $H \rightarrow \gamma\gamma$, on peut retrouver sa masse. Elle est en effet égale à la masse invariante du système

$$m_{\text{inv}}^2 = E^2 - \mathbf{p}^2 \quad (4)$$

Pour deux photons, ou par approximation pour des particules très énergétiques¹, $E_{\gamma_1} = p_{\gamma_1}$ et $E_{\gamma_2} = p_{\gamma_2}$, et alors :

$$m_{\gamma\gamma}^2 = 2(p_{\gamma_1}p_{\gamma_2} - \mathbf{p}_{\gamma_1} \cdot \mathbf{p}_{\gamma_2}) \quad (5)$$

Soit, en travaillant en coordonnées (η, ϕ) :

1. Ici, les particules les plus massives utilisées dans les calculs de masse invariante sont les muons, or $m_\mu = 100 \text{ MeV} \ll 10 \text{ GeV}$, l'ordre de grandeur des énergies des particules considérées

$$m_{\gamma\gamma}^2 = 2E_{\gamma_1}^T E_{\gamma_2}^T [\cosh(\eta_{\gamma_1} - \eta_{\gamma_2}) - \cos(\phi_{\gamma_1} - \phi_{\gamma_2})] \quad (6)$$

Il s'agit alors de calculer cette masse pour tous les évènements contenant une paire de photons susceptible d'être issue d'un Higgs.

Puisque cette relation est vraie y compris pour des particules massives à haute énergie, on peut déterminer la masse du Z à partir des impulsions des leptons issus de sa désintégration.

Afin de déterminer l'impact de la limite en résolution énergétique et angulaire, on estime $\Delta m_{\gamma\gamma}$, en négligeant l'erreur sur ϕ :

$$\Delta m_{\gamma\gamma} \simeq m_{\gamma\gamma} \left(\frac{\sigma_{E_1}}{E_1} + \frac{\sigma_{E_2}}{E_2} \right) + \frac{E_1 E_2 \sinh|\eta_1 - \eta_2|}{m_{\gamma\gamma}} (\sigma_{\eta_1} + \sigma_{\eta_2}) \quad (7)$$

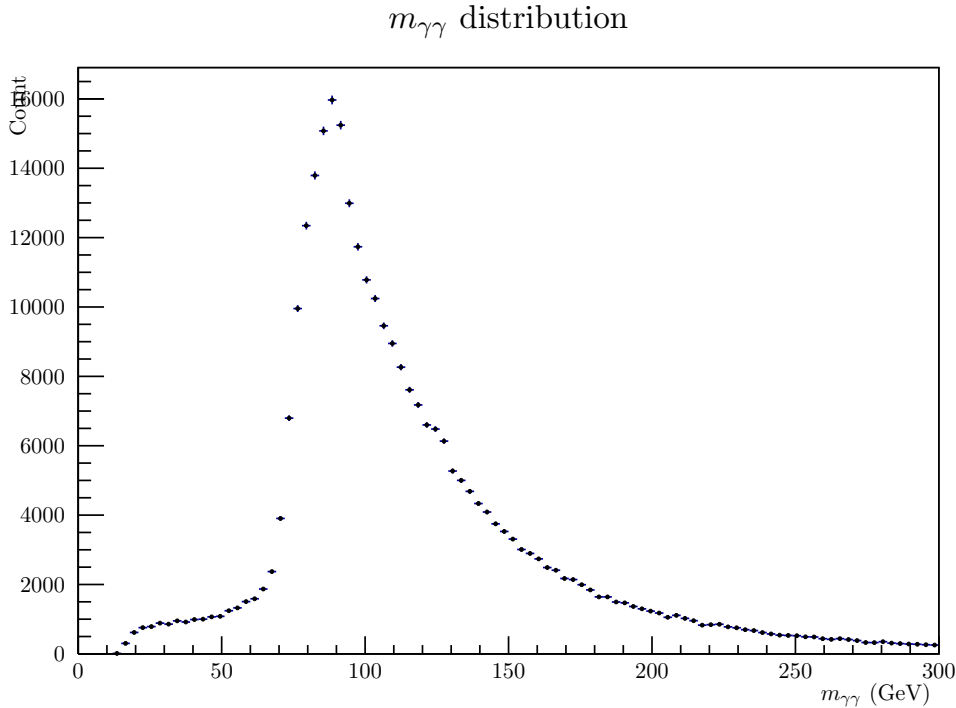
Si un ordre de grandeur suffit :

$$\Delta m_{\gamma\gamma} \sim 2m_{\gamma\gamma} \left(\frac{\sigma_E}{E} + \sigma_\eta \right) \quad (8)$$

4.3 Calcul sur les évènements du Run 1

On sélectionne les évènements contenant des paires de photons 'tight' d'énergie supérieure à 25 GeV lors de la phase à 8 TeV du run 1 ($\int L dt = 20,3 \text{ fb}^{-1}$). On obtient un échantillon de 310 000 évènements pour lequel on calcule la distribution de masse invariante $m_{\gamma\gamma}$. On obtient le résultat suivant :

FIGURE 19 – Distribution $m_{\gamma\gamma}$. On observe un bruit important avec un pic aux alentours de 90 GeV (Z). Le signal correspondant au Higgs est à première vue difficilement distinguable. ($\sqrt{s} = 8 \text{ TeV}$, $\int L dt = 20,3 \text{ fb}^{-1}$)

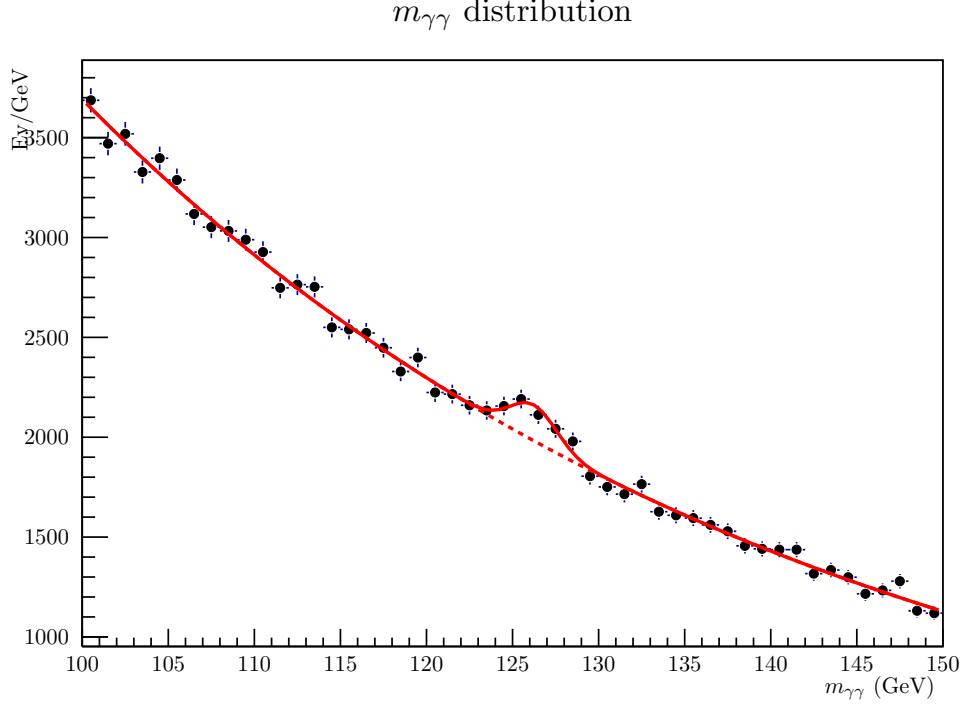


Afin d'extraire le signal correspondant au Higgs, on se restreint à la plage où il est attendu (100 - 150 GeV). Le 'background' y suit une forme exponentielle. On en réalise alors un fit sur une zone où le signal est considéré nul : ici on a choisi $[100;120] \cup [130;150]$. On obtient une fonction de la forme $\text{background} = m_{\gamma\gamma} \mapsto \exp(\xi + \epsilon m_{\gamma\gamma})$.

Puis, sur la plage complète $[100, 150]$, on réalise un fit des données à partir d'une fonction de la forme signal+background : $m_{\gamma\gamma} \mapsto A \exp(-(m_{\gamma\gamma} - m_H)^2/2\sigma^2) + \exp(\xi + \epsilon m_{\gamma\gamma})$

On obtient la figure suivante :

FIGURE 20 – Distribution $m_{\gamma\gamma}$ et fit background+signal. ($\sqrt{s} = 8$ TeV, $\int Ldt = 20,3 \text{ fb}^{-1}$)



On peut en déduire les paramètres physiquement intéressants suivants :

Paramètre	Valeur	Erreur
m_H	126,3 GeV	0,3 GeV
Γ_H	1,3 GeV	0,4 GeV
A	180 GeV ⁻¹	30
$N = \sqrt{2\pi}\Gamma_H A$	586	200

La valeur m_H est la masse du Higgs ainsi mesurée. La valeur σ doit correspondre à la largeur du signal, mais elle est bien supérieure à la valeur théorique. Aux énergies considérées (environ 100 GeV), $\sigma_\eta \sim 0,3\%$ [3] et $\sigma_E \sim 1,5\%$, soit une incertitude $\Delta m_{\gamma\gamma}$ d'environ 2 GeV, du même ordre de grandeur que la largeur mesurée.

A partir de la quantité d'évènements $H \rightarrow \gamma\gamma$ détectés estimée, on peut calculer la luminosité intégrée associée :

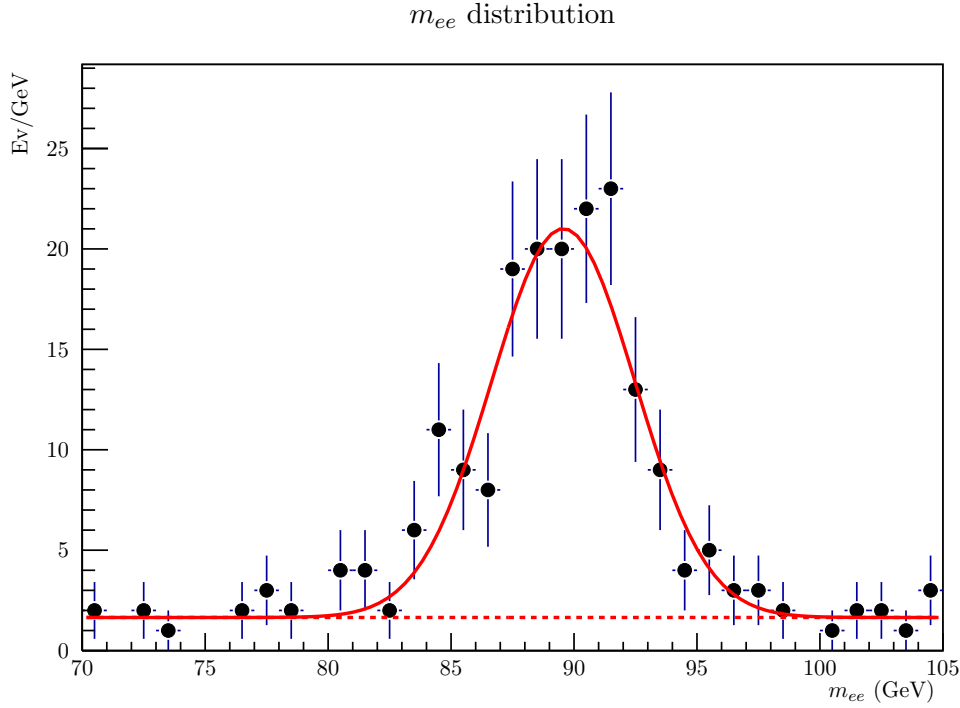
$$\int Ldt = \frac{N}{\xi\sigma} = \frac{586}{0,41 \times 51 \times 10^{-15}} = 28,7 \pm 9,8 \text{ fb}^{-1} \quad (9)$$

Cette résultat est compatible avec la valeur réelle (20,3 fb⁻¹)

4.4 Masse du Z

On s'intéresse cette fois aux évènements comprenant une paire e^+e^- (et deux photons 'loose'). On calcule la masse invariante de la paire d'électrons et on obtient le graphe 21, après un fit du signal sous forme gaussienne et un bruit uniforme.

FIGURE 21 – Distribution m_{ee} et fit sur un intervalle où le signal domine (background plat).



On trouve alors :

Paramètre	Valeur	Valeur attendue
m_Z	$89,6 \pm 0,3$ GeV	91,2 GeV
Γ_Z	$2,9 \pm 1,2$ GeV	2,5 GeV

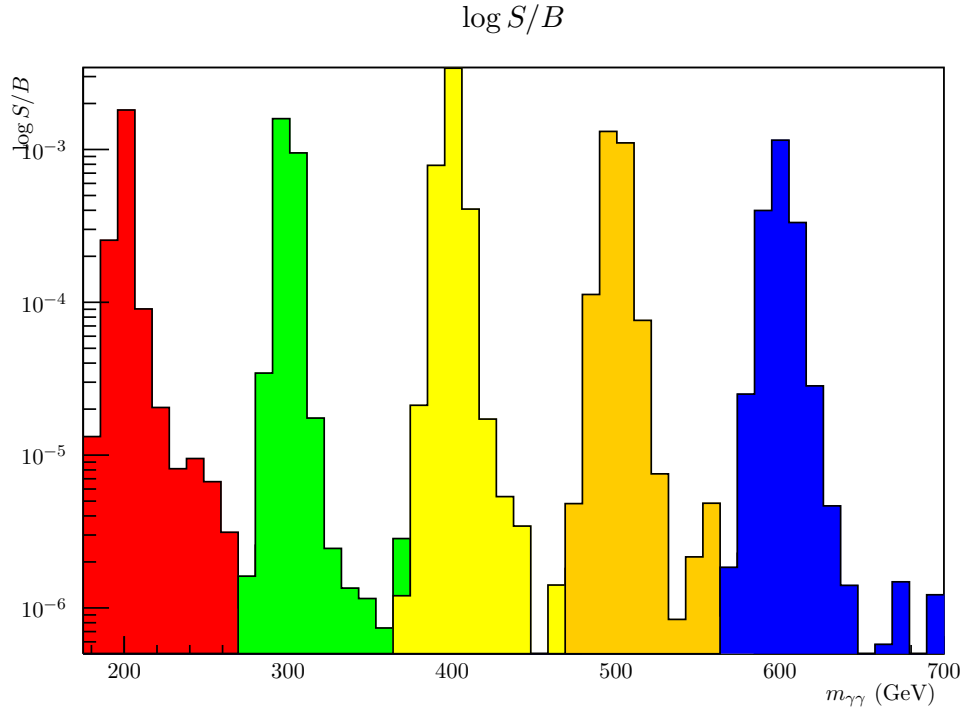
La masse ainsi calculée est correcte plutôt. La largeur est bien plus importante que la valeur théorique. On s'attend à une largeur de la forme $\Gamma_{exp} \sim \sqrt{(\Delta m_{\gamma\gamma})^2 + \Gamma_{SM}^2}$. Les performances de résolution en énergie et directions étant similaires pour les électrons et photons dans le cas $H \rightarrow \gamma\gamma$ et $Z \rightarrow e^+e^-$, on peut considérer que $\Delta m_{\gamma\gamma}$ vaut environ 1,3 GeV également, donc la valeur de Γ_{exp} attendue est de 2,8 GeV ce qui est proche de la valeur trouvée (2,9 GeV).

4.5 Recherche de résonances à des masses supérieures

4.5.1 Hypothèse $m_H > 125$ GeV selon le modèle standard

En connaissant les sections efficaces et ratios de branche du Higgs en fonction de sa masse, et en extrapolant le fit de bruit de fond mesuré à des masses élevées, on peut estimer le ratio signal/bruit de fond pour des scénarios avec un boson de Higgs plus lourd. Cela permet de montrer que le canal $H \rightarrow \gamma\gamma$ n'est pas approprié à la détection de Higgs lourd. Sur la figure 22, on peut en effet constater que le ratio S/B ne dépasse pas 0,01. De plus, le run 1 du LHC n'aurait produit qu'environ 8 événements $H \rightarrow \gamma\gamma$ pour $m_H = 200$ GeV (et aucun pour 300+GeV).

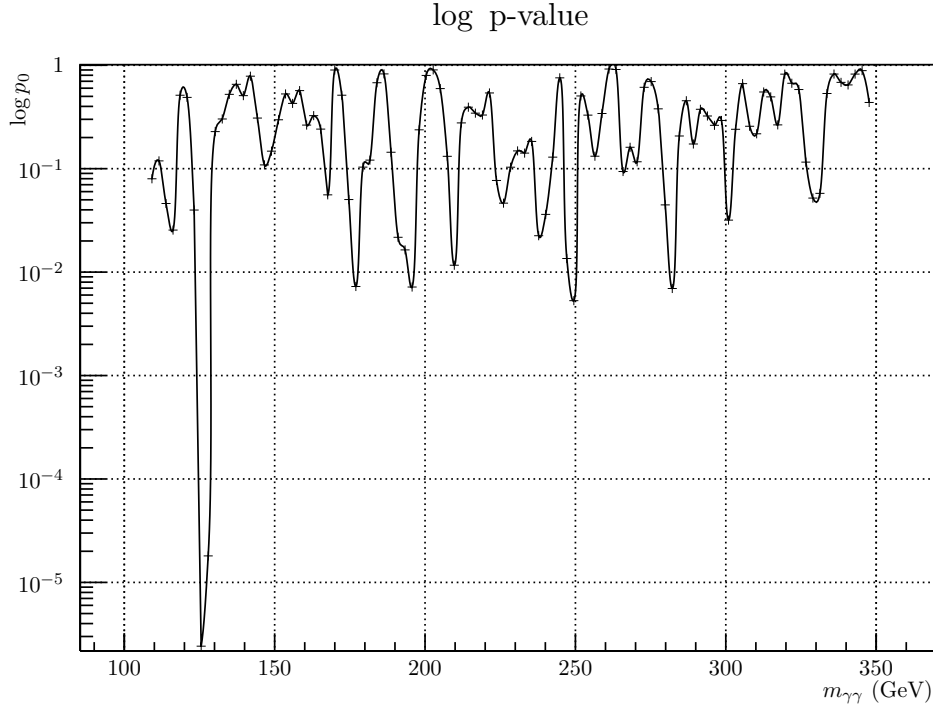
FIGURE 22 – Pour $\sqrt{s} = 8$ TeV, on calcule le rapport entre le signal attendu (monte-carlo) et le bruit de fond, pour $m_H = 200, 300, 400, 500$ et 600 GeV.



4.5.2 Recherches de résonances supplémentaires

On souhaite vérifier qu'il n'existe aucune autre fluctuation significative du bruit pouvant correspondre à un signal pertinent. On recherche des résonances de faible largeur ($\Gamma \sim \text{GeV}$), en comparant les fluctuations de $m_{\gamma\gamma}$ sur des fenêtres d'une largeur de $\pm 2\Gamma$ au background. On en déduit la p-value associée à l'hypothèse d'une absence de signal (fig. 23).

FIGURE 23 – p-value associée à l’hypothèse signal nul. On observe un minimum aux alentours de 125 GeV (correspondant au Higgs). Aucune fluctuation significative n’est repérable pour d’autres masses.



Références

- [1] Higgs cross sections and decay branching ratios. https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/LHCPhysics/CrossSections#Higgs_cross_sections_and_decay_b, 2014. [Online].
- [2] Jung Chang, Kingman Cheung, Jae Sik Lee, and Chih-Ting Lu. Probing the top-yukawa coupling in associated higgs production with a single top quark, 2014.
- [3] J. Colas, L. Di Ciaccio, M. El Kacimi, O. Gaumer, M. Gouanère, D. Goujdami, R. Lafaye, C. Le Maner, L. Neukermans, P. Perrodo, L. Poggioli, D. Prieur, H. Przysieczniak, G. Sauvage, I. Wingerter-Seez, R. Zitoun, F. Lanni, H. Ma, S. Rajagopalan, S. Rescia, H. Takai, A. Belymam, D. Benchekroun, M. Hakimi, A. Hoummada, E. Barberio, Y. S. Gao, L. Lu, R. Stroynowski, M. Aleksa, J. Beck Hansen, T. Carli, P. Fassnacht, F. Gianotti, L. Hervas, W. Lampl, B. Belhorma, J. Collot, M. L. Gallin-Martel, J. Y. Hostachy, F. Ledroit-Guillon, P. Martin, F. Ohlsson-Malek, S. Saboumazrag, S. Viret, M. Leltchouk, J. A. Parsons, M. Serman, F. Barreiro, J. Del Peso, L. Labarga, C. Oliver, S. Rodier, P. Barrillon, C. Benchouk, F. Djama, P. Y. Duval, F. Henry-Couannier, F. Hubaut, E. Monnier, P. Pralavorio, D. Sauvage, C. Serfon, S. Tisserant, J. Toth, D. Banfi, L. Carminati, D. Cavalli, G. Costa, M. Delmastro, M. Fanti, L. Mandelli, M. Mazzanti, G. F. Tartarelli, K. Kotov, A. Maslennikov, G. Pospelov, Y. Tikhonov, C. Bourdarios, C. de La Taille, L. Fayard, D. Fournier, L. Ionomidou-Fayard, M. Kado, M. Lechowski, G. Parrou, P. Puzo, D. Rousseau, R. Sacco, N. Seguin-Moreau, L. Serin, G. Unal, D. Zerwas, B. Dekhissi, J. Derkaoui, A. El Kharrim, F. Maaroufi, A. Camard, D. Lacour, B. Laforge, I. Nikolic-Audit, P. Schwemling, H. Ghazlane, R. Cherkaoui El Moursli, A. Idrissi Fakhr-Eddine, M. Boonekamp, B. Mansoulié, P. Meyer, J. Schwindling, B. Lund-Jensen, and Y. Tayalati. Position resolution and particle identification with the ATLAS EM calorimeter. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 550 :96–115, September 2005.